

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет \_\_\_\_\_ електроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ мікроелектроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

«До захисту допущено»

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ О. В. Борисов \_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Дипломна робота  
на здобуття ступеня бакалавра**

з напрямку підготовки \_\_\_\_\_ 6.050801 «Мікро- та нанoeлектроніка» \_\_\_\_\_  
(код і назва)

на тему \_\_\_\_\_ Оптоелектронний сенсор \_\_\_\_\_

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-51

\_\_\_\_\_ Охрімчук Олександр Борисович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ проф. Вербицький Володимир Григорович \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

**Консультанти:**

з нормоконтролю \_\_\_\_\_ доц., к.т.н. Орлов А. Т. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

з інформаційних технологій \_\_\_\_\_ ст. викл., к.т.н. Діденко Ю. В. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень  
з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

5. Висновки

**5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу** 1. Схеми вимірювання сенсорів з волоконно-оптичним чутливим елементом. 2. Схеми волоконно-оптичних інтерферометрів. 3. Оптичний сенсор для охорони об'єктів.

**6. Консультанти розділів роботи:**

з технологічних питань \_\_\_\_\_

(назва розділу)

(підпис, вчене звання, посада, ПІБ)

**7. Дата видачі завдання** “22” лютого 2019 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН виконання дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів виконання роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання
1	Огляд літератури та постановка задач по дипломній роботі.	18.04.2019	
2	Опрацювання матеріалів, виконання практичних завдань.	28.04.2019	
3	Висновки по переддипломній практиці .	01.05.2019	
4	Написання звіту по практиці.	06.05.2019	
5	Підготовка матеріалів для дипломного проекту.	15.05.2019	
6			
7			

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_

(підпис)

**Охрімчук О.Б.**

(ініціали, прізвище)

**Керівник дипломної роботи** \_\_\_\_\_

(підпис)

**В.Г. Вербицький**

(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Роботу викладено на 50 сторінках, вона містить 5 розділів, 17 ілюстрацій, 2 таблиці та 25 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження став оптоелектричний сенсор.

Предмет роботи – дослідження оптоелектричного сенсору.

Метою даної роботи є ознайомлення з особливостями оптоелектронних сенсорів і їх повсякденним застосуванням.

В першому розділі роботи йдеться про особливості оптоелектронних сенсорів.

У другому розділі представлені волоконно-оптичні сенсори на основі зміни зв'язку між елементами і середовищем.

Третій розділ описує функції і структури волоконно-оптичних елементів.

В четвертому розділі описуються особливості роботи сенсорів, що використовують інтерференцію світла.

В п'ятому розділі йдеться про практичне застосування оптоелектронних сенсорів, а саме в охоронних системах.

## **ABSTRACT**

The work is presented in 50 pages, it contains 5 sections, 17 illustrations, 2 tables and 25 sources in the list of references.

The object of the study was an optoelectronic sensor.

The subject of the work is the research of the optoelectronic sensor.

The purpose of this work is to familiarize with the features of optoelectronic sensors and their everyday applications.

The first section of the paper deals with the features of optoelectronic sensors.

The second section presents fiber-optic sensors based on a change in the relationship between the elements and the environment.

The third section describes the functions and structures of fiber-optic elements.

The fourth section describes the features of the operation of sensors using light interference.

The fifth section deals with the practical application of optoelectronic sensors, namely security systems.

# ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	1
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	5
ВСТУП .....	7
1. ОСОБЛИВОСТІ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ .....	8
2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СЕНСОРИ, НА ОСНОВІ ЗМІНИ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ І СЕРЕДОВИЩЕМ .....	11
3.ФУНКЦІЇ І СТРУКТУРИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....	15
4. ПРИНЦИП РОБОТИ СЕНСОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ІНТЕРФЕРЕНЦІЮ СВІТЛА .....	22
4.1. Структури волоконно-оптичних інтерферометрів та шумові фактори....	22
4.2. Принцип інтерферометра Маха-Цендера .....	28
4.3. Інтерферометр Майкельсона.....	30
4.4. Інтерферометр Фабрі-Перо. Структура і принцип роботи .....	32
4.5. Інтерферометр з міжмодовою інтерференцією та інтерферометр з двосерцевинним волокном .....	36
4.6. Метод компенсації пасивного типу.....	37
4.7. Метод світлового квазігетеродинування .....	37
5. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СЕНСОРИ .....	39
5.1. Використання оптоелектронних сенсорів у системах охорони та безпеки об'єктів .....	39
5.2. Сенсор для охорони об'єктів .....	41
ВИСНОВКИ.....	43

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	44
------------------------	----

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$BOC$  – волоконно-оптичний сенсор

$B_1, B_2, B_3$  – сталі, що визначаються потужністю джерела світла, ефективністю зв'язку у відгалужувачі тощо

$D$  – діаметр світловоду

$e$  – основа натурального логарифму

$F$  – показник якості резонатора

$f_r$  – вільна область спектра

$HE_{11}$  – мода

$I_1, I_2$  – інтенсивності світлових хвиль

$k$  – стала, що визначається типом напівпровідникового лазера

$L$  – неспіввідношення торців світловодів

$l$  – довжина волокна

$NA$  – числова апертура світловодів

$P$  – електричний сигнал змінного струму з фазовою модуляцією;  
вихідний сигнал

$P_1, P_2$  – інтенсивність інтерференції світлових хвиль; значення вихідних  
сигналів

$P_2$  – вихідний сигнал світлоприймача 2

$P_3$  – вихідний сигнал світлоприймача 3

$P_\omega$  – складова у вихідному сигналі  $P$

$R$  – коефіцієнт відбивання напівпрозорого дзеркала за інтенсивністю  
світла

$S$  – відстань між торцями світловодів

$\gamma$  – ступінь когерентності інтерференції

$\Delta f_r$  – половинна ширина резонансної кривої

$\Delta l$  – різниця довжин двох оптичних шляхів; різниця оптичної довжини  
шляху



$\Delta\beta$  – різниця між сталими поширення двох світлових хвиль

$\Delta\omega$  – частотна різниця між світловими хвилями

$\eta$  – стала

$\theta$  – кут між оптичними осями світловодів

$\varphi$  – різниця фаз

$\varphi_d$  – різниця фаз дрейфу в низькочастотній області, викликаного коливанням температури

$\varphi_s$  – фаза вихідного сигналу

$\omega$  – колова (кругова) частота; частота джерела світла; оптимальна несуча частота

## ВСТУП

Оптоелектроніка – наука , яка набула найширшого розвитку в другій половині ХХ століття, вона досліджує перетворення світлового випромінювання в електричний і навпаки. Вагомим внеском при вивченні оптоелектроніки було створення оптоелектронних волокон. В свою чергу ці волокна поділяються на два типи: одномодові і багатомодові. В залежності від досліджуваного типу оптоволокон вони застосовуються в пристроях з різними характеристиками: одномодові – лініях зв'язку з високою швидкістю передачі інформації, багатомодові – в лініях зв'язку з відносно невисокою швидкістю.

Для волоконно-оптичних датчиків є характерними наступні властивості: еластичність, малий діаметр і маса. Саме завдяки цим характеристикам ВОС і набули широкого застосування.

Сьогодні ВОС дає нам можливість вимірювати практично все: тиск, температуру, відстань, положення в просторі, швидкість обертання, швидкість лінійного переміщення, прискорення, коливання, масу, звукові хвилі, рівень рідини, деформацію, коефіцієнт заломлення, електричне поле, електричний струм, магнітне поле, концентрацію газу, дозу радіаційного випромінювання, на використуванні пучків таких волокон ґрунтується вся техніка ендоскопії.

Саме широке застосування даного пристрою і спонукало мене до написання даної роботи.

# 1. ОСОБЛИВОСТІ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ

Для волоконно-оптичних вимірювальних та керуючих систем потрібні різні датчики, які перетворюють контрольовані значення (температуру, тиск, швидкість тощо) у сигнали, зручні для передачі по волоконно-оптичних лініях зв'язку. Як правило, датчик складається з декількох блоків. Перший - це чутливий елемент, званий первинним перетворювачем, який сприймає вимірювану величину і виробляє сигнал, пов'язаний з його значенням. У наступних ланках датчика здійснюється подальше, іноді дуже складне, перетворення сигналу первинного перетворювача в необхідний вихідний сигнал. Найбільш перспективним є використання суто оптичних перетворювачів і датчиків, оскільки в той же час використовується вся перевага ВОС в цілому. Інформативним параметром можуть бути амплітуда, фаза, частота і поляризація оптичного випромінювання, і цей знак є суттєвим для класифікації датчиків. Відповідно до ролі Сонця в схемі, також можна виділити дві категорії волоконно-оптичних датчиків (ВОС), в яких літак є чутливим елементом, і які використовуються як оптичний шлях для підключення датчика. елементи. Вимоги до Сонця в цих випадках істотно відрізняються. Важливою особливістю практики є використання когерентних ефектів, оскільки це визначає складність і вартість ВОС. Крім того, ВОС характеризується типом вимірювання, методом вимірювання (прямим, диференційним, компенсаційним і т.д.), обсягом і умовами експлуатації (стаціонарні, мобільні, бортові тощо), конструктивні особливості та інші . При проектуванні ВОС найбільш важливими питаннями є раціональний вибір відповідного фізичного ефекту і специфічна схема його реєстрації, а також вибір волоконної оптики, найбільш придатної для умов роботи в різних частинах оптичного контуру.

Інтерес до волоконно-оптичних сенсорів (ВОС) обумовлений низкою їх переваг у порівнянні з традиційними первинними вимірювальними перетворювачами:

- Висока чутливість, що перевищує чутливість, наприклад кріогенні перетворювачі;
- Великий динамічний діапазон зміни параметрів вимірювання;
- відносна простота;
- геометрична універсальність, тобто можливість створення перетворювача довільної форми;
- малі габарити;
- можливість вимірювання у важкодоступних і віддалених місцях (дистанційні вимірювання);
- можливість досягнення великої тривалості взаємодії ВОС з зовнішнім значенням;
- створення безконтактних перетворювачів;
- відсутність чутливості до зовнішніх електромагнітних перешкод (завадостійкість);
- Повна електрична ізоляція ВОС (високий електричний опір);
- широкий температурний діапазон роботи;
- здатність працювати в агресивних середовищах (корозійної стійкості), займистих і вибухонебезпечних приміщеннях за умов іонізуючого випромінювання та випромінювання;
- загальну технологічну основу для створення ВОС найрізноманітнішого призначення (технологічна, фізична універсальність);

- сумісність ВОС з інтегральною оптичною технологією та елементами;
- можливість створення перетворювачів, які не потребують електроживлення (пасивний режим).

Серед недоліків ВОС можна назвати невелику механічну міцність світловодів, труднощі введення випромінювання в одномодовий світловод, нелінійність характеристик передачі, відсутність єдиної концепції під час розробки.

Найбільш широке використання ВОС було виявлено для вимірювання параметрів фізичних полів і величин, що описують стан навколишнього середовища (температура, механічний тиск, електромагнітні поля і т.д.).

## **2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СЕНСори, НА ОСНОВІ ЗМІНИ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ І СЕРЕДОВИЩЕМ**

ВОС, на основі зміни оптичного зв'язку між складовими волокон, утворюють велику групу перетворювачів, в яких розбіжність волоконної оптики досягається наступними змінами:

- розташування кінців волоконної оптики за місцем їх з'єднання;
- положення оптично з'єднаних елементів волоконної оптики;
- оптичні параметри елемента, пов'язаного з волоконною оптикою;
- оптичні параметри середовища навколо світловода;
- положення або параметри люмінесцентного елемента, оптично приєднаного до світловода.

Коефіцієнт зв'язку між світловими провідниками істотно залежить від взаємного розташування кінців цих світловодів в місці їх з'єднання. Основними факторами невідповідності світлових провідників є відстань між кінцями  $S$ , кут між оптичними осями світлових провідників  $\Theta$ , неузгодженість кінців  $L$ , а також якість обробки і форма торцевих поверхонь. На основі цих факторів створюються регульовані волоконно-оптичні атенюатори, в яких з'єднання між двома сегментами світлодіодів регулюється зміною відстані між кінцями, кутовим положенням, бічним зміщенням кінців, а також поєднання цих операцій. Відповідні розрізи ребер світлодіодів  $S / D \sim 0.1$ ,  $\Theta \sim 4$  кути. град,  $L / D \sim 0.2$  ( $D$  - діаметр світловода) призводить до зменшення випромінювання приблизно на  $0,5 \text{ d } 1$  дБ, залежно від числової апертури світлових провідників.  $NA \sim 0,15 \text{ } 0,5$ . Діапазон смуги пропускання - 30 дБ. Атенюатори фактично є перетворювачами переміщень.

Розчинення волокон за рахунок зовнішнього впливу є основою різних БОК: анемометри, кутові акселерометри, оптичні тензодатчики, датчики

зусиль і переміщень, гідрофони і т.п. ВОС, на основі дисоціації кінців волокон, представляють інтерес також для вимірювання параметрів магнітного поля, електричного струму, характеристик магнітних систем. Типова конструкція такого ВОС може бути представлена наступним чином: трансмісійне волокно, в яке випромінювання вбудовано консольно: Вільний кінець трансферного волокна армований феромагнітним елементом (для цієї мети на бічній поверхні волокна біля кінця може бути нанесена тонка плівка Ni, Fe, Co, пермалою тощо). Приймає волокно, з якого випромінювання надходить в фотоперетворювач, нерухомо фіксується в місці розташування кінця передавального волокна, що збігається з ним. Після нанесення магнітного поля волокна, армовані феромагнітним елементом, згинається, що викликає невідповідність кінців передавальних і приймаючих волокон. За цим принципом, наприклад, може бути створений пристрій для дослідження рівномірності магнітного поля магнітної системи - рух магнітної системи вздовж ВОС, що дозволяє вимірювати значення індукції поля в кожній точці системи. вивчали.

Іншою групою є ВОК, в якій розбіжність волоконної оптики досягається зміною положення оптично з'єднаного елемента або зміною його оптичних властивостей. Такі ВОС є аналогами атенюаторів, в яких ослаблення світлового потоку через передавальну і приймальну волоконну оптику досягається введенням у простір між кінцями волокон різних затухаючих елементів: прозорих або напівпрозорих пластин, фільтрів змінних щільності, тіні екрани, поляризаційні фільтри, змінні діафрагми та інші елементи. БО такого типу призначені для вимірювання тиску, вібрації, температури, зміщення, характеристик обертання тощо. ВОС з рухомим елементом, оптично зв'язаним з волоконною оптикою, може використовуватися для випромінювання параметрів магнітного поля, якщо магнітна маса фіксована або кінематично пов'язана з рухомим елементом.

Загальним недоліком ВОС з рухомим елементом є наявність пружних елементів або кінематичних зв'язків, чутливих до сейсмічних і вібраційних впливів. Цей недолік позбавлений ВОС, в якому елемент руху оптично з'єднаний з волоконною оптикою, а його оптичні параметри змінюються у відповідності зі зміною контрольованого параметра. Значна перевага надається ВОС, які використовують єдиний світловий провідник з відбиваючим покриттям, який служить в якості передавального і приймаючого світловода. Принцип роботи гідрофону може бути використаний ВОС для вимірювання магнітного поля.

Флуоресцентні ВОС включають певний елемент, який є вторинним джерелом світіння. У деяких випадках це спрощує конструкцію ВОС і забезпечує обробку і виділення сигналу, оскільки зазвичай світіння люмінесценції відбувається на довжинах хвиль, відмінних від довжини хвилі збуджуючого випромінювання. Відомі конструкції люмінесцентних ВОС різного призначення - ВОС температури, тиску, прискорення, хімічних процесів в розчинах і т.п. Вони можуть бути використані для випромінювання магнітного поля і електричного поля, якщо рухомий елемент ВОС забезпечений магнітною масою або параметрами люмінесцентного випромінювання є функцією цих полів. Існує декілька можливостей для створення люмінесцентного ВОС, параметри випромінювання є функцією магнітного поля, заснованого на:

- Відмінності в круговій поляризації правих і лівополяризованих компонентів у поздовжньому магнітному полі;
- зміна ширини спектру випромінювання в магнітному полі, спрямованому перпендикулярно до руху випромінювача електрона, що вводиться зарядом, наприклад, в гетероструктурах на основі Gal-xAlxAS;
- зміни інтенсивності випромінювання внаслідок дії на багат шарову гетероструктуру магнітного поля, спрямованого перпендикулярно руху носія



заряду, введеного з n-емітера. Волоконно-оптичний вимірювальний пристрій цього типу для керування електричним напругою або магнітним полем включає ВОС, який з'єднаний волоконно-оптичною з електронним вимірювальним блоком. Пристрій складається з 2 джерел світла з різними спектрами випромінювання для збудження фотолюмінесценції, 2 фотоприймача для запису флуоресцентного світла на виході перетворювача. Перетворювач містить люмінесцентний шар, перед яким є фільтри з різними характеристиками передачі. Збуджуюче випромінювання направляє світловод через один фільтр на люмінесцентний шар і змушує його генерувати носії заряду. При наявності електричного або магнітного поля носії заряду переносяться на інші ділянки шару і рекомбінуються. Результуюча люмінесценція спалахує через другий фільтр, і світловий провідник сприймається фотоприймачами. Інтенсивність випромінювання є мірою електричної або магнітної величини.

### 3. ФУНКЦІЇ І СТРУКТУРИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Для роботи волоконно-оптичного чутливого елемента датчика, фазовий зсув хвилі, що поширюється вздовж оптичного волокна, поляризація, кут повороту площини поляризації, зміна втрат, явище розсіювання світла під впливом використання зовнішніх факторів.

Класифікація систем чутливих елементів на оптичному волокні наведена на рис. 3.1.

На рис. 3.1,а також представлена схема інтерферометра з оптичним шляхом, реалізованим на одномодовому волокні або на волокні зі збереженням поляризації. Як вже зазначалося, в одномодовому волокні застосовується лише режим  $HE_{11}$ , який є основним. Цей режим можна вважати приблизно лінійно поляризованим, і поширення інтенсивності в поперечному перерізі пучка підпорядковується закону Гауса, що дозволяє порівняно просто досягти стабільної інтерференції. Насправді, у звичайному багатомодовому оптичному волокні можливе поширення двох мод  $HE_{11}$  з ортогональною поляризацією. У цьому випадку, внаслідок нерівномірно округлої форми поперечного перерізу оптичного волокна між режимами, спостерігається різниця фаз, внаслідок чого випромінювання оптичного волокна стає еліптично поляризованим.

В інтерферометрі в таких умовах інтерференційні смуги розмиваються, тому необхідно вводити поляризатор або використовувати оптичне волокно при збереженні поляризації. Крім того, в датчиках, таких як інтерферометр, як правило, необхідні заходи проти дрейфу нуля, зміни масштабного коефіцієнта і погіршення лінійності. Вимірювання перешкод - вимірювання відстаней у довжинах хвиль або у довжинах хвиль світла - зазвичай забезпечує високу чутливість. Використання оптичного волокна у вигляді

кільця з великою кількістю витків збільшує довжину зв'язків з об'єктом, що вимірюється, і таким чином дозволяє йому додатково збільшувати чутливість датчика. В результаті вимірювання фази була досягнута чутливість  $10^{-6}$  рад / ГГц. Відомі публікації про датчики цієї системи, чутливість яких порівнянна або більша, ніж датчики інших систем (табл. 3.1).

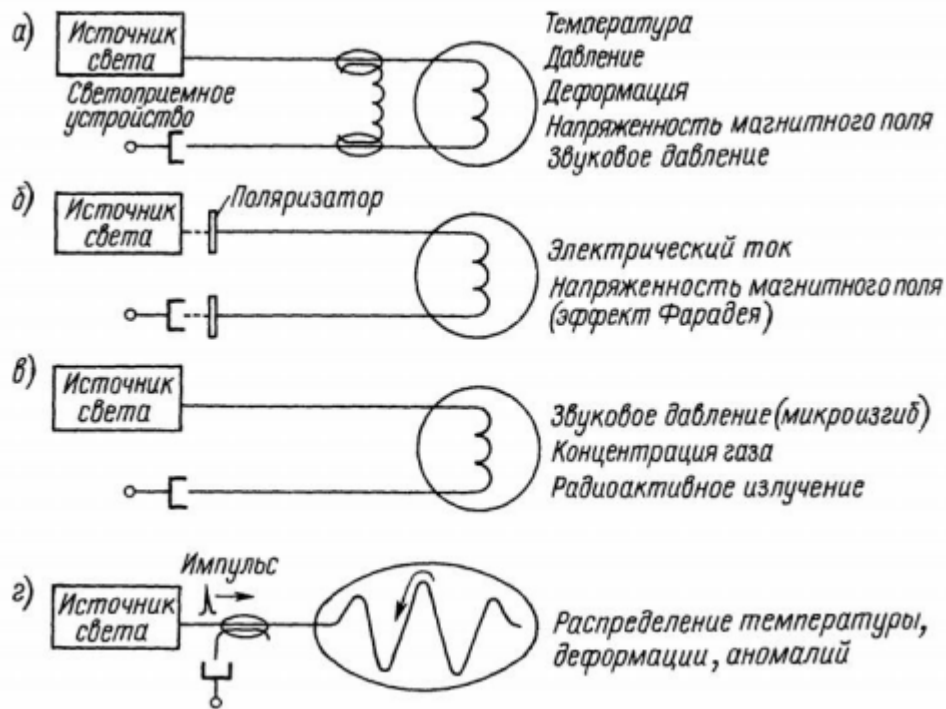


Рис. 3.1. Узагальнені схеми та об'єкти вимірювання сенсорів з волоконно-оптичним чутливим елементом, що функціонує на основі зміни фази (а), повороту площини поляризації (б), зміни втрат (в) та розсіювання (г)

Таблиця 3.1.

Характеристика сенсорів з оптичним волокном в якості чутливого елемента

Тип сенсора	Фізична величина та об'єкт вимірювання	Фізичне явище (властивість), що використовується	Фізична величина (явище), що детектується	Параметри та особливості	Тип волокна
Кільцевий	Кут повороту	Ефект Саньяка	Інтенсивність	0,02°/г.	Одномодова

інтерферометр	Електричний струм	Ефект Фарадея	(фаза) світла, що інтерферує	Скручене волокно.	
Кільцевий інтерферометр Фабрі-Перо	Кут повороту	Ефект Саньяка	Резонансне	$\approx 1^\circ/\text{г}$ .	
Інтерферометр Маха-Цендера	Гідроакустичні хвилі	Фотопружність	Інтенсивність (фаза) світла, що інтерферує	1...100 рад/(м*К)	
	Температура	Теплове стиснення розтягнення		$\approx 100$ рад/(м*К)	
	Електричний струм, напруженість магнітного поля	Магнітострикція		Мінімальна чутливість $10^{-8} \text{ A/m}^2$	
	Електричний струм	Ефект Джоуля		$\approx 10 \text{ мкА}$	
	Прискорення	Механічне стиснення та розтягнення		1000 рад/g	
	Поглинання світла газом	Теплове випромінювання в результаті поглинання		$5 \cdot 10^{-9}$ для $\text{NO}_2$	
	Електрична напруга, напруженість електричного поля	Електрострикція		$\approx 2,2 \cdot 10^{-5}$ рад/(В*м)	
	Деформація	Зміна фази світла внаслідок деформації волокна		Добра частотна характеристика	
Інтерферометр Майкельсона	Швидкість потоку крові	Ефект Доплера	Частота биття	$10^{-4} \dots 10^3 \text{ м/с}$	Багатомодове

	Електричний струм, напруженість магнітного поля	Магнітострикція		$\approx 10^{-8} \text{ А/м}^2$	Одномодове
Інтерферометр Фабрі-Перо	Гідроакустичні хвилі	Фотопружність	Багаторазова інтерференція	Висока чутливість	Одномодове зі збереженням поляризації
	Температура	Теплове стиснення та розтягнення	Багаторазова інтерференція	Не вимагається опорної напруги	
	Швидкість потоку	Коливання тіла в потоці	Частота коливань	Те саме	
	Спектр джерела світла	Хвильова фільтрація	Інтенсивність світла	Висока роздільна здатність	
Інтерферометр з поляризованими модами	Температура	Теплове стиснення та розтягнення	Інтенсивність інтерферуючого світла	Конструкція на одному оптичному волокні	Зі збереженням поляризації
	Гідроакустичні хвилі	Фотопружність			
	Електричний струм, напруженість магнітного поля	Магнітострикція			
Міжмодовий інтерферометр	Температура	Теплове стиснення та розтягнення	Інтерференція між модами	Конструкція на одному оптичному волокні	Двомодове
	Швидкість потоку	Коливання тіла в потоці	Багатомодова інтерференція		Багатомодове
Інтерферометр на волокні з двома осердями	Крутіння	Зміна сталої передавання	Інтенсивність інтерферуючого світла	Чутливість декілька десятків мікрометрів	З подвійним осердям
	Зміщення				
	Температура				
Сенсор на основі	Електричний струм,	Ефект Фарадея	Обертання площини	Скручене волокно	Одномодове

обертання площини поляризації	напруженість магнітного поля		поляризації		
Сенсор на основі зміни втрат	Гідроакустичні хвилі	Втрати на мікрозгинах	Інтенсивність світла, що пропускається	≈100мПа	Багатомодове
	Концентрація газу	Поглинання хвиль		-	Одномодове
	Доза радіоактивного випромінювання	Формування центру зафарбування		0,01...1 Мрад	Багатомодове
Сенсор розподілу послідовного типу	Розподіл температури	Релеєвське розсіювання	OTDR	≈ 100 м	Рідке осердя
	Розподіл температури	Риманівське розсіювання	OTDR Рамана	≈ 200 м	Багатомодове
	Температура, деформації волокна	Втрати на мікрозгинах	OTDR	Сплав з запам'ятовуванням форми	Багатомодове
	Електричний струм, напруженість магнітного поля	Ефект Фарадея	POTDR	Багатовідвідна конструкція	Одномодове
Сенсор розподілу паралельного типу	Коливання, температура	-	-	Некогерентний інтерферометр	Одномодове
				Розгортка частоти джерела світла	Одномодове
				Некогерентна модуляція інтенсивності	Багатомодове

У датчиках типу інтерферометра використовуються різні функції оптичного волокна (рис. 3.2). Найбільш поширеними вимірними значеннями є температура, довжина, тиск. Відповідно до їх коливань змінюється довжина та показник заломлення оптичного волокна, внаслідок чого змінюється і фаза світла, що поширюється в ньому. Вимірювальні значення, відмічені у крайній правій частині рис. 3.2, перетворюються в будь-яке з трьох значень, наприклад, за допомогою відповідного покриття, нанесеного на оптичне волокно. Запропоновані амперметри на оптичному волокні з алюмінієвим покриттям, акселерометр зі стисненням (або розтягуванням) оптичного волокна від руху вантажу, магнітного поля напруги випромінювачів або електричної напруги - з покриттям оптичного волокна у відповідності з магнітострикційним і електрострикційним матеріалом або з електрооптичним волокном, намотаним на циліндр з цих матеріалів. Поряд з цим можливі різні інші конструкції подібних датчиків на оптичному волокні.

На рис. 3.1,б наведена діаграма сенсора, яка використовує обертання площини поляризації. По суті, це відповідає вимірювачу струму або інтенсивності магнітного поля на ефекті Фарадея. Наведений на рис. 3.1,в чутливий елемент на основі вимірювання втрат досліджується з точки зору його застосування в датчику тиску, концентрації газу та радіоактивного випромінювання. На рис. 3.1,г наведена схема сенсора розподілу, вимірювання частоти відбиття відбивача датчика розподілу (OTDR). Цей метод був розроблений для виявлення розриву оптичного волокна в лінії зв'язку і визначення втрат вздовж оптичного волокна. Вона передбачає вимірювання дуже слабкого зворотного розсіювання Релея в системі з високим відношенням сигнал - шум. Останнім часом досліджуються структури датчиків, що працюють за цим принципом, для вимірювання розподілу таких змінних, як температура, тиск і т.д. Таблиця 3.1 дає уявлення про напрям дослідження датчиків зазначених типів.



Рис. 3.2. Функціональні можливості волоконно-оптичного чутливого елемента, що працює на основі зміни фази світла



## 4. ПРИНЦИП РОБОТИ СЕНСОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ ІНТЕРФЕРЕНЦІЮ СВІТЛА

### 4.1. Структури волоконно-оптичних інтерферометрів та шумові фактори

На рис. 4.1 зображені основні структури волоконно-оптичних інтерферометрів, а саме, на рис. 4.1, а і б - структури, особливо важливі для волоконно-оптичних гіроскопів. Вони утворюють єдину систему. Обидві ці структури будуть переглянуті знову. В інтерферометрах Маха-Цендера і Майкельсона один кінець двох одномодових оптичних волокон призначений для чутливого елемента, інший - для опорного сигналу. Навпаки, інтерферометри Фабрі-Перо і поляризовані інтерферометри модемів виготовляються тільки на одному оптичному волокні і розраховані з урахуванням використовуваних певних особливостей волокна.

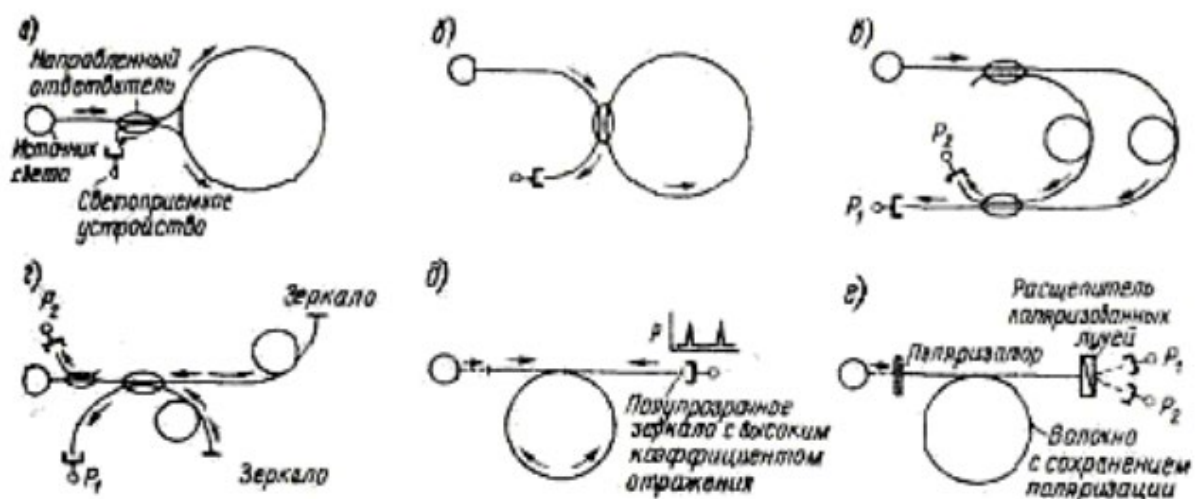


Рис. 4.1. Схеми волоконно-оптичних інтерферометрів

Формування вихідного сигналу. У структурі інтерферометрів, за

винятком інтерферометрів Фабрі-Перо, інтенсивність інтерференції  $P_1$  і  $P_2$  при інтенсивності двох світлових хвиль  $I_1$  і  $I_2$  (на рис. 4.1, є це світлові хвилі з ортогональною поляризацією) може бути визначена за формулами:

$$P_1 \approx I_1 + I_2 + \gamma 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (4.1)$$

$$P_2 \approx I_1 + I_2 - \gamma 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (4.2)$$

У цих формулах  $\gamma$  є показником, який називається ступенем когерентності інтерференції. Це функція від добутку ширини  $\Delta f$  спектральної лінії джерела світла і різниці  $\Delta l$  довжини двох оптичних шляхів:

$$\gamma(\Delta f \Delta l) \leq 1$$

і при  $\Delta f \Delta l = 0$  дорівнює одиниці.

У разі зміни різниці фаз  $\varphi$  між світловими хвилями бажано збільшити чутливість (тобто збільшити крутизну зміни вихідних сигналів  $P_1$  і  $P_2$ ) до  $\Delta f \Delta l \rightarrow 0$ . Для заданого значення  $\Delta f$  можна знайти значення  $\Delta l$ , де параметр  $\gamma$  буде дорівнює  $e^{-1}$ , і цю довжину називають довжиною когерентності (когерентної відстані) джерел світла. Для звичайного гелій-неонового лазера одномодового напівпровідникового лазера і гелій-неонового лазера з одним режимом довжина когерентності становить відповідно кілька десятків сантиметрів, близько 10 м і близько 1 км. Таким чином, джерело світла повинен бути обраний у відповідності зі структурою інтерферометра. Крім того, з формул (4.1) і (4.2) ми маємо, що для  $I_1 = I_2$  чутливість до зміни фази є оптимальною.

Зауважимо, що у формулах (4.1) і (4.2) для двох інтерференційних вихідних сигналів  $P_1$  і  $P_2$  знаки з при  $\cos \varphi$  є протилежними. Це досягається, якщо спрямований відгалужувач, що об'єднує два промені світла або поляризованого розгалужувача, не має втрат. У більшості випадків світло з інтенсивністю  $I_1 + I_2$  передається у двох оптичних трактах у повному обсязі, що є хорошою ілюстрацією закону збереження енергії. Це можна перевірити,

провівши більш суворий (за допомогою закону Стокса) аналіз характеристик відбиття в спліт-променях або спрямованому відгалужувачі.

Шумовий фактор і заходи щодо його зменшення. Різниця спеціальності  $\varphi$  між двома світловими хвилями може бути представлена у вигляді фази вихідного сигналу  $\varphi_s$  і дрейфу  $\varphi_d$  у низькочастотній області, обумовленої в основному варіаціями температури:

$$\varphi = \varphi_s + \varphi_d \quad (4.3)$$

Зазвичай важко позбутися від впливу коливань температури, тому як сигнал, що використовується у волоконно-оптичному інтерферометричному датчику, приймається лише змінна складова, розташована над смугою частот дрейфу температури. Зрозуміло, що це обмеження не є прийнятним для датчика температури і для оптичної системи з волокном опорного сигналу. У таких випадках на одному оптичному волокні використовується інтерферометр (рис. 4.1, в і є).

На рис. 4.2 наведені криві залежності інтенсивності вихідного сигналу від  $\varphi_s$  і  $\varphi_d$ . Зрозуміло, що, за винятком випадку застосування для термометра, фаза  $\varphi_d$  визначає робочу точку для фази  $\varphi_s$ . Отже, робочу точку необхідно встановлювати в точці А на рисунку, де, наприклад, значення  $dP/d\varphi_s$  максимальне. Крім того, у разі флуктуацій інтенсивності I1 і I2 (див. формулу (4.1)) масштаб осі ординат змінюється на рис. 4.2, тобто відбувається зміна масштабного коефіцієнта датчика. Більш того, як видно з картини, якщо вхідний сигнал (фаза  $\varphi_s$ ) має велику амплітуду, вихідний сигнал нелінійний, що створює певну проблему. Таким чином, при створенні датчика оптичного волокна, такого як інтерферометр, дрейф нуля, необхідно враховувати насамперед флуктуації масштабного фактора і нелінійність.

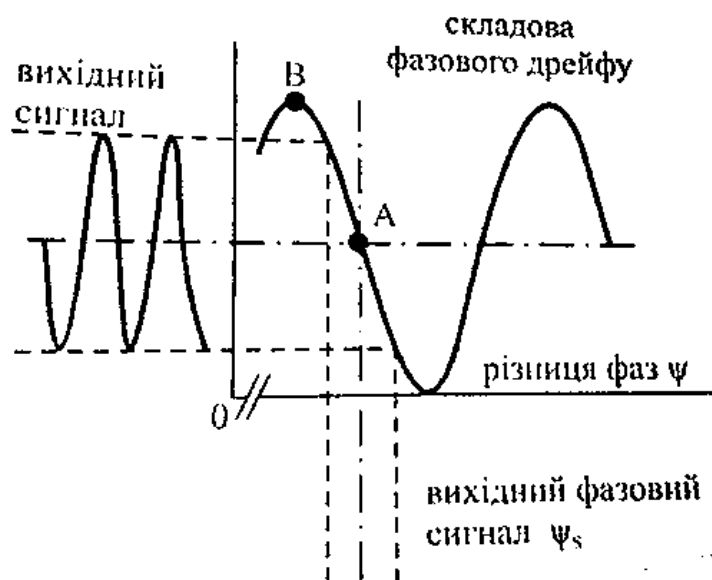


Рис. 4.2. Визначення робочої точки в інтерферометрі

Заходи проти цих небажаних факторів відрізняються для методів легкої гомодинів і гетеродинаміки. Метод світлової гомодинаміки передбачає рівність частот двох заважаючих світлових хвиль і прийому вихідного сигналу, який визначається за формулами (4.1) і (2.2). Навпаки, якщо в одній з оптичних трактів вводиться частотний перемикач і встановлюється різниця частот  $\Delta\omega$  між світловими хвилями, то, згідно з формулою (4.1), отримуємо електричний фазовий сигнал з фазовою модуляцією, тобто:

$$P = I_1 + I_2 + \gamma\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\omega t + \varphi_d + \varphi_s)$$

Таблиця 4.1

Метод	Особливості	Загальна характеристика
Активне світлове гомодинування	Для компенсації дрейфу доцільне використання фазообертача	Однакова частота двох інтерферуючих світлових хвиль; вихідний сигнал формується шляхом прямої
Пасивне світлове	Вихідні сигнали, що	

гомодинування	відповідають $\sin \theta$ та $\cos \theta$ , підлягають аналоговій обробці. Допускається робота зі світловою хвилею довільної форми	амплітудної модуляції
Світлове гетеродинування	Доцільне використання частотного зсувача, наприклад акустооптичного модулятора	За допомогою фазової модуляції несучої з частотою $\Delta\omega$ формується сигнал, пропорційний до різниці частот $\Delta\omega$ двох інтерферуючих світлових хвиль.
Світлове квазігетеродинування	Частотний зсувач не вимагається. За допомогою фазового або частотного модулятора проводиться обробка сигналу для виділення несучої	

Фазове виявлення цього сигналу може бути отримати  $\varphi_d + \varphi_s$ , що відповідає сутності методу гетеродинаміки світла. Як видно з табл. 4.1, в першому способі три згадані проблеми вирішуються вдосконаленням оптичної системи, а в другому, головним чином, шляхом вдосконалення електроніки з метою більш повного використання техніки фазового детектування. Однак акустооптичний модулятор, з технічної точки зору, є найбільш прийнятним у наш час для частотного зсуву, але не має таких недоліків, як відносно високе енергоспоживання (близько 2 Вт) і відхилення високої частоти (приблизно 100 МГц). Останнім часом проводяться дослідження щодо створення частотних перемикачів на нових принципах, а також розроблений метод оптичної квазігетеродинаміки - вихід вихідного сигналу без використання частотного перемикача.

На рис. 4.3, а наведена найбільш загальна схема інтерферометра з гомодинуванням.

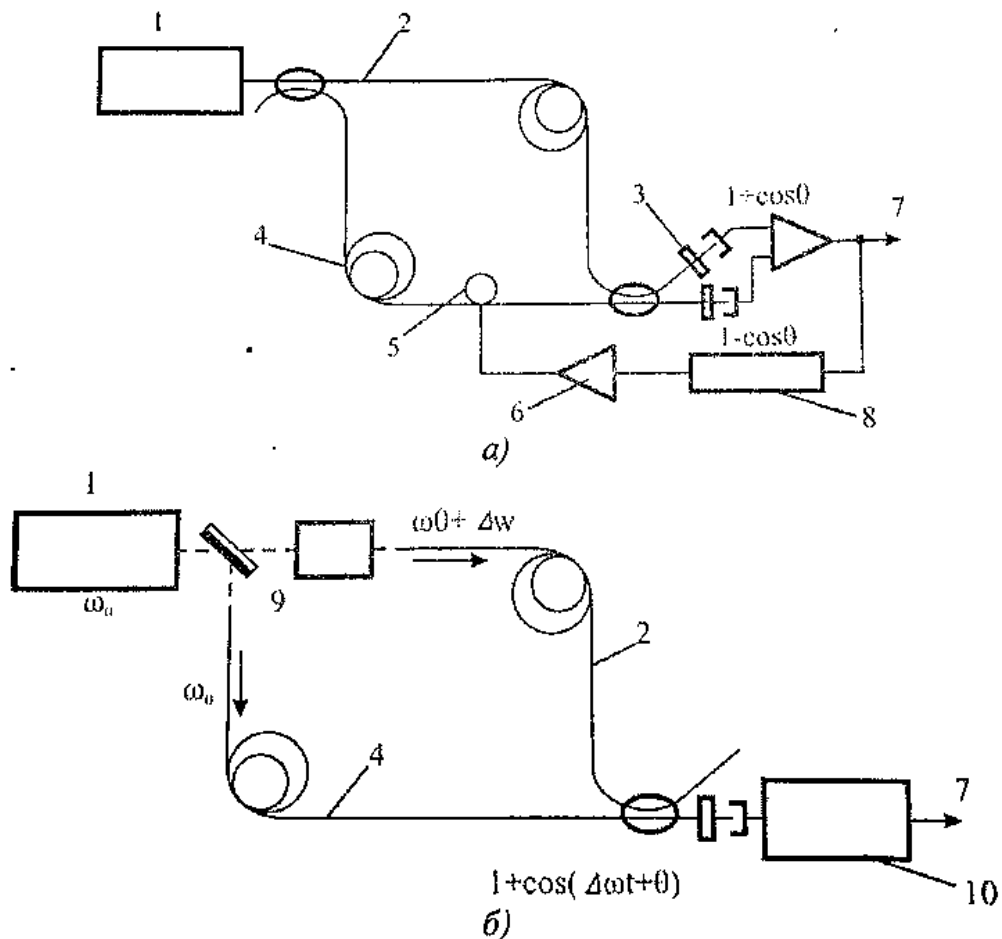


Рис. 4.3. Інтерферометр одномодовий з активною стабілізацією (а) та гетеродинний (б): 1 – джерело випромінювання; 2 – чутливе волокно (сигнал В); 3 – поляризатор; 4 – волокно опорного сигналу; 5 – волоконний фазовий зсувач; 6 – підсилювач; 7 – вихідний сигнал; 8 – інтегратор; 9 – частотний зсувач; 10 – фазовий детектор.

У цій структурі компонент дрейфу  $\varphi_d$  компенсується волоконно-оптичним фазовим модулятором. Тут, використовуючи диференціальний підсилювач з вихідного сигналу інтерферометра, виключається компонент  $I_1 + I_2$  постійного струму (див. формули (4.1) і (4.2)), а низькочастотна складова подається в контур зворотного зв'язку, і в результаті робоча точка встановлюється в точці А (рис. 4.2). Навіть після такої модифікації системи два з трьох залишаються вищезазначеними проблемами. Тому необхідно ввести процедуру поділу вихідного сигналу або компенсувати зміни потужності джерела світла, які контролюють його за допомогою оптичного волокна з збереженням поляризації, за допомогою моніторингу сигналів  $I_1$  і  $I_2$ . Ці

проблеми можуть бути вирішені шляхом введення так званого нульового методу (обговорюється нижче). Для структури на рис. 4.3, а вже вимірювання різниці фаз порядку  $10^{-6}$  рад/Гц.

Розглянемо конкретні приклади оптичних систем у відповідності з їх класифікацією за структурою інтерферометра, а також методи вирішення зазначених вище завдань з керівництвом отриманих характеристик. Слід зазначити, як видно з табл. 3.1, що наведені тут структури інтерферометрів не обмежуються вимірами розглянутих величин, а є універсальними. Особливо великий обмін характеризується інтерферометрами Маха-Цендера і Майкельсона, які використовуються на практиці, але все ще є предметом дослідження.

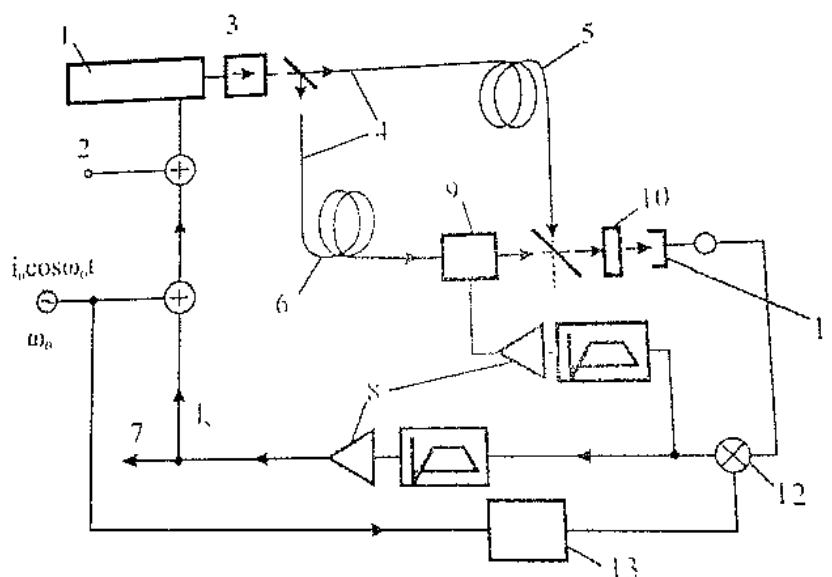
#### **4.2. Принцип інтерферометра Маха-Цендера**

Структура з гомодинамікою і частотною модуляцією напівпровідникового лазерного випромінювання. Якщо сигнал виходить методом гомодинаміки, заходи щодо усунення цих трьох коефіцієнтів шуму відносяться в основному до оптичної системи. У цьому випадку в одному з оптичних шляхів вводиться фазовий модулятор світла і через нього здійснюється зворотний зв'язок для зміни вихідного сигналу перешкод. Потім, після появи вихідного сигналу, вихідний сигнал Р визначається точкою А (рис. 4.2): точка А відповідає нульовому вихідному сигналу, оскільки ця схема не відповідає диференційній системі на рис. 4.3,а. В результаті вихідний сигнал не тільки не впливає на коливання I1 і I2, але також покращує його лінійність. Однак для цього потрібна хороша частотна характеристика і лінійність фазового модулятора.

Розглянемо структуру, в якій гомодинамічний метод реалізований з використанням прямої частотної модуляції випромінювання напівпровідникового лазера без використання фазового модулятора (рис. 4.4).

$$\Delta\theta = \frac{\Delta l}{c}\Delta\omega_0 \frac{\Delta l}{c}k\Delta I \quad (4.4)$$

$$P_\omega \approx J_1(\eta)\sin(\varphi_d + \varphi_s) \quad (4.5)$$





*Рис. 6. Інтерферометр з гомодинуванням і прямою частотною модуляцією випромінювання напівпровідникового лазера: 1 – світлодіод; 2 – струм зміщення; 3 – ізолятор; 4 -  $\Delta l$ ; 5 – чутливе волокно (сигнал  $\Delta\theta_x$ ); 6 – волокно опорного сигналу; 7 – вихідний сигнал; 8 – підсилювач; 9 – компенсатор температурного дрейфу; 10 – поляризатор; 11 – світло приймальний прилад; 12 – балансний зміщувач; 13 – фазовий модулятор.*

З формули (4.5), значення  $P_\omega$  в точці  $B$  найбільш чутливе до зміни суми  $\varphi_d + \varphi_s$ . У цьому випадку, як видно з рис. 4.3,а, не потрібно позбавлятися від постійної складової вихідного сигналу інтерференційної системи, і тому (рис. 4.4) потрібно лише один приймач світла, що робить оптичну систему простішою. В схемі на рис. 4.4 сигнал дрейфу температури, який має більшу амплітуду, ніж вихідний сигнал, передається через петлю зворотного зв'язку на фазовий модулятор світла, виконаний з п'єзoeлемента.

Оптична система, наведена на рис. 4.4, містить одномодове волокно довжиною 9 м і одномодовий напівпровідниковий лазер з прихованою гетероструктурою з інтервалом когерентності близько 10 м. Якщо  $\Delta l = 7,5$  см, то  $k$  стає рівним 1 ГГц / мА.

### 4.3. Інтерферометр Майкельсона

Волоконно-оптичний інтерферометр також вивчається досить активно. Зокрема, лазерний доплерівський вимірювач швидкості можна розглядати як датчик інтерферометра Майкельсона.

На рис. 4.5,а наведена схема вимірювання магнітного поля постійного струму, з дзеркалами, нанесена на кінці одномодового оптичного волокна. П'єзoeлектричний перетворювач, як і в інтерферометрі Маха-Цендера, призначений для компенсації дрейфу температури. Оптичне волокно чутливої частини датчика вводиться в нікелевий циліндр. Нікель - магнітострикційний матеріал. У магнітному полі циліндр деформується, що призводить до зміни

довжини оптичного волокна та його показника заломлення, що, у свою чергу, призводить до фазової модуляції. Відомі й інші подібні структури михельсонових інтерферометрів, наприклад, із застосуванням магнітострикційного покриття на поверхні поверхні. Досягнута в цих інтерферометрах чутливість становить  $4 \cdot 10^{-7} \text{ А / м}$  ( $5 \cdot 10^{-9} \text{ Е}$ ) на 1 м довжини оптичного волокна.

Магнітострикційний матеріал володіє нелінійними властивостями, тому якщо калібрований сигнал змінного струму (рис. 4.5,а) подається, то реакція матеріалу, а точніше, зміна амплітуди цього сигналу, як видно з рис. 4.5,б, залежить від магнітного поля постійного переміщення. Отже, наприклад, якщо встановлено постійне зміщення в точку А (рис. 4.5,б), то можна визначити інтенсивність магнітного поля постійного зміщення або низькочастотного струму, змінюючи амплітуду калібрувального сигналу змінного струму. На рис. 4.5,в пояснюється виявлення низькочастотного напруги магнітного поля. Як датчик подається сигнал 285 Гц. Вимірювання постійного струму за допомогою звичайного волоконно-оптичного інтерферометричного датчика ускладнюється дрейфом температури, але в інтерферометрі Майкельсона успішно використовується нелінійність магнітострикційного матеріалу.

Існує досить багато повідомлень про аналогічні вимірювачі магнітного поля та амперметри щодо використання магнітострикційних матеріалів. У зв'язку з цим вивчається метод компенсації гістерезису, взаємозв'язок між способом нанесення покриття і чутливістю, здійснюється можливість виготовлення довгих (наприклад, 2 км і більше) оптичних волокон з нікелевим покриттям.

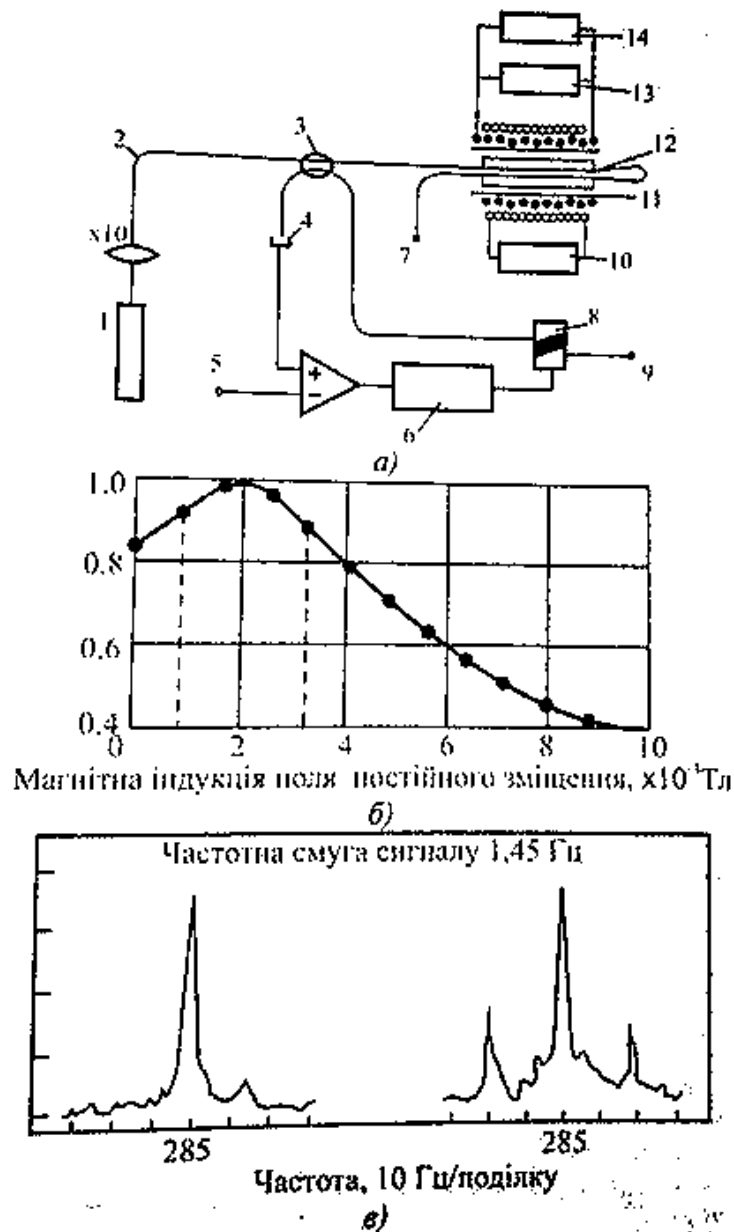


Рис. 7. Вимірювач напруженості магнітного поля на основі інтерферометра Майкельсона (а), характеристика магнітострикційного ефекту для нікелю (б) та результати вимірювання магнітного поля постійного і низькочастотного струму (в): 1 – гелій-неоновий лазер; 2 – одномодове волокно; 3 – розгалужувач; 4 – світло приймальний пристрій; 5 – опорне навантаження; 6 – схема компенсації; 7 – дзеркало; 8 – п'єзоелектричний перетворювач; 9 – дзеркало; 10 – генератор змінного струму для корекції; 11 – соленоїд; 12 – нікелевий циліндр (довжина 25см); 13 – генератор низькочастотного тестового сигналу; 14 – схема заміщення постійного струму

#### 4.4. Інтерферометр Фабрі-Перо. Структура і принцип роботи

Як показано на рис. 4.6,а, встановлюючи один проти кожного напівпровідникового дзеркала, можна створити резонатор світла з фазовою характеристикою, що різко змінюється, коли світло проходить між дзеркалами А і В в обох напрямках (рис. 4.6,б).

Якщо зміна фази множиться на  $2\pi$ , виникає резонанс. Тоді при частоті джерела світла  $\omega$  є фазовим діапазоном обертання  $\theta = 2\omega l / c$ , тому таку ж резонансну характеристику можна отримати, змінивши як  $l$ , так і  $\omega$ . Частотний інтервал  $f_r$  називається вільною областю спектра,  $\Delta f_r$  - половина ширини резонансної кривої:

$$f_r = c/(2l)$$

$$\Delta f_r = \frac{c}{\pi\sqrt{R}} \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}}$$

де  $R$  - коефіцієнт відбиття світлопрозорого дзеркала відповідно до інтенсивності світла.

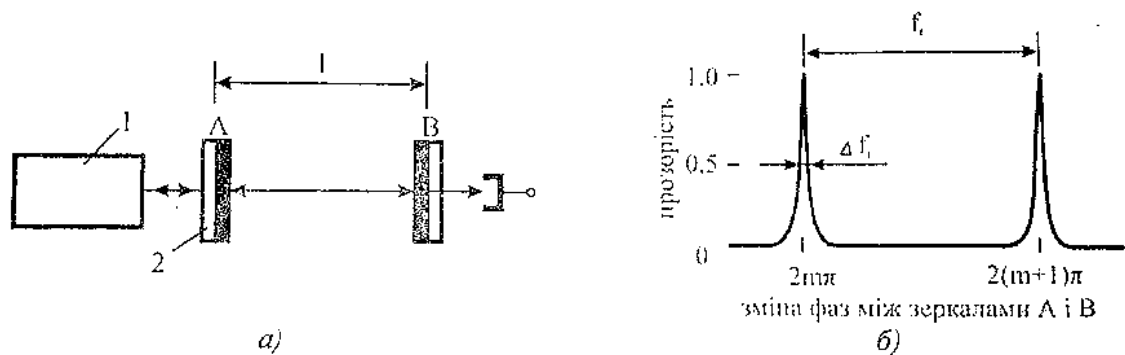


Рис. 4.6. Основна структура (а) та вихідна характеристика (б) інтерферометра Фабрі-Перо: 1 – джерело світла; 2 – напівпровідникове дзеркало з високим показником відбивання

Показник якості резонатора:

$$F = \frac{f_r}{\Delta f_r} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

як видно з формули, також визначається коефіцієнт відбивання  $R$ .

Як правило, чутливість вихідного сигналу до зміни фази вхідного світла в інтерферометрі Фабрі-Перо  $F$  рази вище, ніж у звичайного.

Якщо якимось чином розширити резонатори, то діапазон  $\theta$  і, отже, чутливість структури до коливань  $l$  (наприклад, під впливом температури або тиску) зростають. У той же час, значення  $\Delta f_r$  зменшиться і тим самим збільшить роздільну здатність частоти. Однак, створюючи інтерферометр зі структурою як на рис. 4.6 з окремих оптичних компонентів, необхідно надати певну кривизну напівпрозорим дзеркалам з урахуванням дифракції світлової хвилі; отже, подовження резонатора ускладнюється і робить інтерферометр більш дорогим. Для усунення цих недоліків було розроблено волоконний інтерферометр Фабрі-Перо з прямим розпиленням одномодового оптичного волокна напівпрозорого дзеркального покриття з високим коефіцієнтом відбиття.

Для того, щоб виміряти акустичні або механічні коливання волоконно-оптичного інтерпретатора Фабрі-Перо, необхідно встановити робочу точку, яка оптимізує чутливість сигналу змінного струму, як у випадку інших конструкцій інтерферометрів, - методом постійного струму (рис. 4.3,а), або змінного струму (рис. 4.4). Як видно з рис. 4.6, в результаті підвищення чутливості інтерферометра його динамічний діапазон обмежений, і для окремих випадків необхідний нульовий метод. Волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо, по суті, може бути виконаний на одному оптичному волокні і може вимірювати температуру без опорного волокна. Вихідний сигнал (рис. 4.7) дозволяє обчислити імпульси, представляючи зміну температури в цифровій формі. У цьому прикладі отримаємо  $100\text{імп}/(\text{м}^*\text{К})$ .

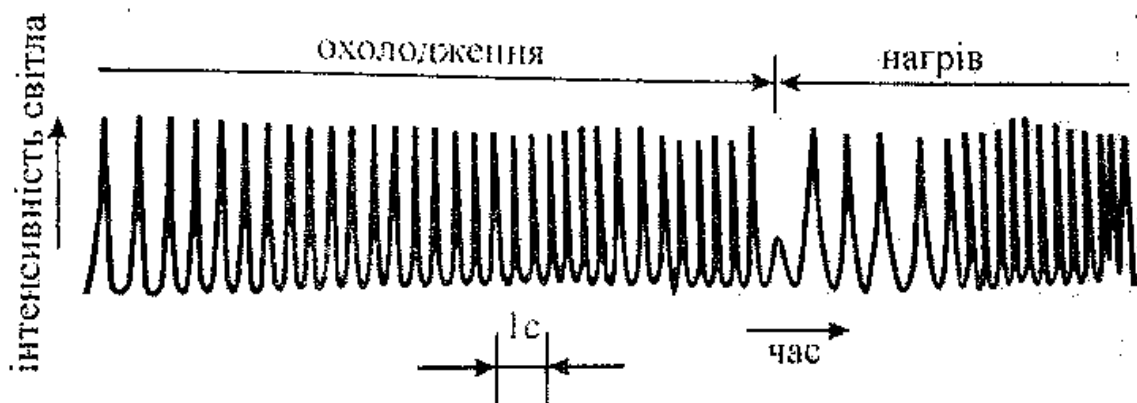


Рис. 4.7. Вихідний сигнал інтерферометра Фабрі-Перо в залежності від температури

У більшості випадків принцип роботи волоконно-оптичного інтерферометра в якості датчика температури заснований на залежності довжини або показника заломлення оптичного волокна від температури, і в цьому напрямку проводяться теоретичні та експериментальні дослідження. Відомо, що для кварцового оптичного волокна без покриття виходить чутливість близько  $100 \text{ імп} / (\text{м} \cdot \text{К})$ , а покриття кремнію або деяких інших матеріалів значно підвищує цю чутливість. Досліджуються наступні матеріали - способи нанесення покриттів на оптичне волокно, що робить інтерферометр нечутливим до температурних коливань. Волоконно-оптичний інтерферометр Фабрі-Перо також вивчається як датчик температури для медицини. Досліджено методи підвищення чутливості гідрофону на цьому інтерферометрі, проведено теоретичні дослідження характеристик інтерферометра з урахуванням ширини спектру джерела живлення. Якщо джерело світла має ширину спектра  $\Delta f$ , то загальна ширина резонансної кривої всієї системи на рівні півколу буде  $\Delta f + \Delta f_r$ .

Враховуючи втрати в оптичному волокні, індекс якості резонатора  $F$  є функцією довжини волокна. Відомо, що завдяки товщині багат шарових електричних плівок, нанесених на кінці оптичного волокна (напівпрозорі дзеркала), промені, екрановані від них, не повністю збігаються з фазою в

волокні, що знижує якість резонатора. Це зменшення може бути дещо зменшено, надаючи кінцям волокна форму лінзи перед нанесенням покриття.

#### 4.5. Інтерферометр з міжмодовою інтерференцією та інтерферометр з двосерцевинним волокном

Розглянуто два інтерферометра: на основі інтерференції між двома режимами з ортогональною поляризацією в одному оптичному волокні зі спеціальним оптичним волокном, що має два одномодових ядра (оптичне волокно з подвійним ядром).

На рис. 4.8,а зображена структура інтерферометра інтермодальними перешкодами. Запальний світло з лінійною поляризацією за допомогою чверті хвильової пластини перетворюється на світло з круговою поляризацією і, отже, режими з ортогональною поляризацією рівномірно збуджуються в оптичному волокні зі збереженням поляризації. Якщо одночасно на кінці волокна встановити розгалужувач поляризованих хвиль (призма Волластона) з нахилом своєї осі щодо осі поляризації під кутом  $45^\circ$ , значення вихідних сигналів  $P_1$  і  $P_2$  буде визначатися за формулами (4.1) і (4.2). Різниця фаз між світловими хвилями виражається як  $\Delta\beta l$ , де  $\Delta\beta$  - різниця між постійним поширенням двох світлових хвиль,  $l$  - довжина волокна. З змінною  $l$  і  $\Delta\beta$  також змінюється вихідний сигнал перешкод, тобто інтерферометр функціонує як датчик. У цьому випадку  $\Delta\beta$  менше, ніж постійне поширення  $\beta$  режиму  $HE_{11}$  на кілька порядків, що зменшує чутливість датчика.

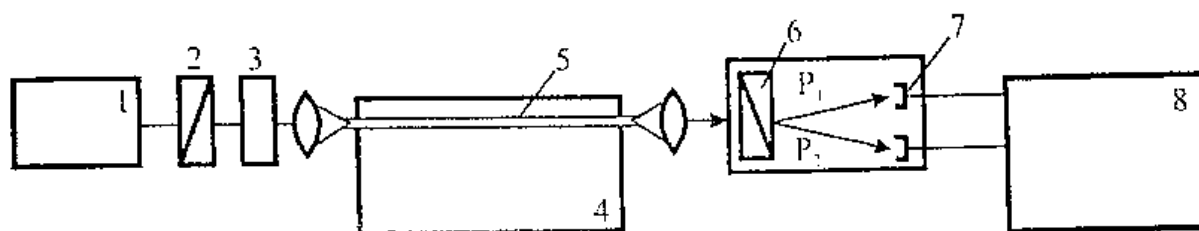


Рис. 4.8. Структура пристрою для вимірювання температури інтерферометром з міжмодовою інтерференцією: 1 – гелій-неоновий лазер; 2 – поляризатор; 3 – чверть

*хвильова пластина; 4 – регулювання температури; 5 – волокно зі збереженням поляризації;  
6 – призма Воластона; 7 – світло приймальний пристрій*

Для датчиків використовується оптичне волокно з двома одномодовими ядрами. У цьому випадку в торсіонному датчику, наприклад, різниця між постійним розподілом (за рахунок різниці розмірів сердечників або їх показників заломлення) використовується під впливом температури або інших факторів, є різниця фаз. Нарешті, прикладом інтерферометричного датчика на одному оптичному волокні може бути датчик температури, який використовує інтерференцію між двома режимами, що поширюються в волокні: один з них є первинним, а другий - наступним порядком.

#### **4.6. Метод компенсації пасивного типу**

Розглянуті датчики є гомодинамічними інтерферометрами, з інтерферометрами активного типу, які характеризуються установкою робочої точки щодо сигналу, тобто компенсацією дрейфу (за винятком температури) шляхом організації зворотного зв'язку через фазовий модулятор. світлова хвиля. Розглянемо також гомодинамічні інтерферометри, але зі збільшенням чутливості до сигналу без активного механізму фазової компенсації в оптичній системі.

Пропонований спосіб обробки вихідного сигналу, в результаті якого для сигналу з заданою частотою, незалежно від характеру дрейфу, отримуємо чутливість, обмежену амплітудою дрейфу. На рис. 4.9,а і б наведені відповідно оптична система і аналогова схема обробки для вимірювального методу, незалежно від впливу будь-якого дрейфу змінного струму. У розроблених входах і трьох виходах. У цьому випадку вихідні сигнали приймачів світла можуть бути записані як:

$$P_2 = B_1 + B_2 \cos \varphi + B_3 \sin \varphi$$

$$P_3 = B_1 + B_2 \cos \varphi - B_3 \sin \varphi$$

де  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  - сталі, яка визначається потужністю джерела світла, ефективністю зв'язку в муфті і т.д.





## 5. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СЕНСОРИ

### 5.1. Використання оптоелектронних сенсорів у системах охорони та безпеки об'єктів

Перетворення інформації про зміни параметрів довкілля може бути локальною, коли тільки частина світловода виконує функцію перетворювача, а решта світловода працює, як лінія передачі інформації (рис. 5.1). Можна також сконструювати сенсор, де вся довжина світловода працює як перетворювач (рис. 5.1,а). В цьому випадку мова йде про сенсор з внутрішнім розподілом.

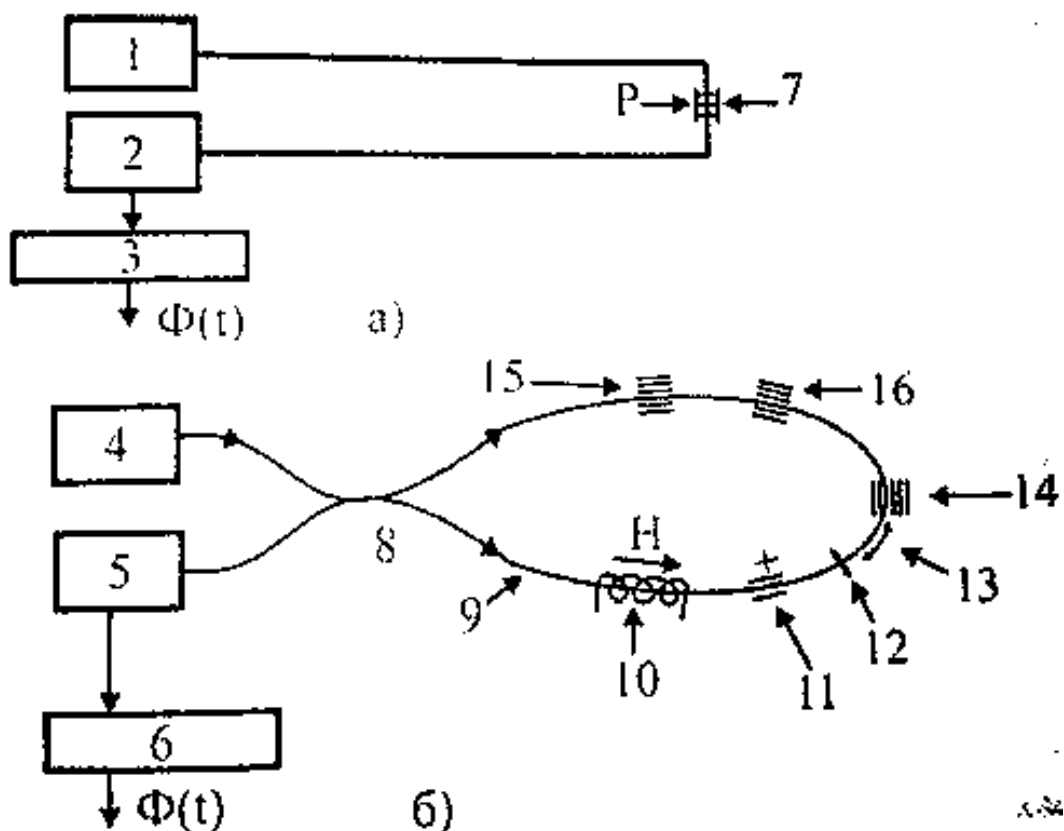
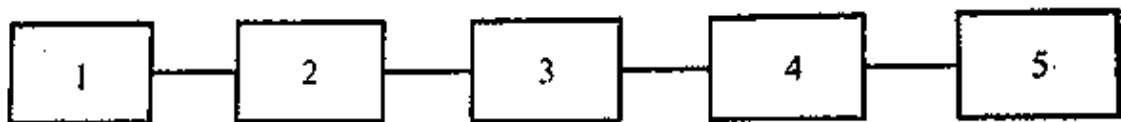


Рис. 5.1 Оптичні сенсори з локальним (а) і розподіленим (б) оптоелектронними перетвореннями поля збурень у сенсорі ( $\Phi(t)$  – функція збурень): 1,4 – джерело; 2,5 – детектор; 3,6 – демодулятор; 7 – поле  $\Phi(t)$ ; 8 – з'єднувач; 9 – петля; 10 – магнітне поле; 11 – електричне поле; 12 – згин петлі; 13 – переміщення; 14 – акустичне поле; 15 – температура; 16 – тиск

Основними елементами сенсора з внутрішнім розподілом є джерело світла, світловод, фотодетектор, демодулятор. Завданням оптоелектронних елементів є генерація оптичної хвилі, реєстрація змін параметрів хвилі і перетворення змін параметрів світла в електричний сигнал. Технічне використання сенсора вимагає додавання до нього певної електричної системи, яка показана на рис. 5.2. Завданням демодулятора є детектування не тільки поля збурення, але і виявлення змін цих збурень як функції часу  $\Phi(t)$ .

Застосування даного сенсора може бути різноманітне. Наприклад, на рис. 5.1,б представлено можливість вимірювання оптичним сенсором змін в об'єктах охорони. В даному випадку чутливим елементом є світловод. Функція чутливості в технічних системах охорони показана на рис. 5.2.

Сенсор в технічних системах охорони є детектором утворення сигналів певного рівня у відповідності до появи чи зміни фізичних збурень у світловоді. Сенсор передає сигнал до системи сигналізації, яка оцінює величину сигналу і порівнює з заданими параметрами системи. Система сигналізації в такому випадку відбирає сигнали сенсора зі вказуванням значень: небезпека, ушкодження і т.д.



*Рис. 5.2. Функціонування сенсора в системі охорони об'єктів: 1 – сенсор; 2 – модуль детектора сигналу; 3 – аналізуюча система; 4 – телекомунікаційний блок; 5 – блок сигналізації*

Функціональна схема волоконно-оптичного сенсора представлена на рис. 5.3. Чутливим елементом сенсора є замкнена петля світловода. Демодулятор сенсора перетворює електричний сигнал з фотодетектора з функцією збурення світловода  $\Phi(t)$ . Сигнал з демодулятора, поданий на системи є розкладеним на складові частини спектру. Отриманий спектр є характеристикою даного виду збурення. Характеристику функції збурень

використовують для автоматичної ідентифікації виду збурення і оцінює вид тривоги.

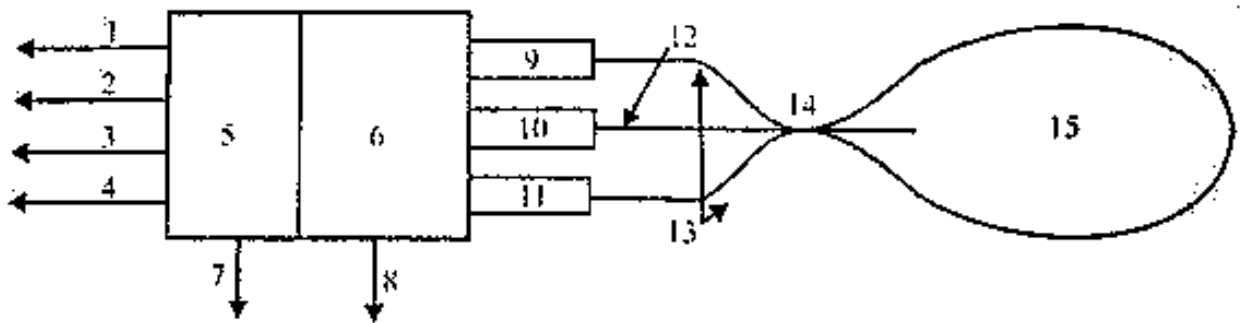


Рис. 5.3. Схема інтелектуального волоконно-оптичного сенсора: 1 – сигналізація; 2 – ушкодження; 3 – похибка; 4 – з'єднання; 5 – основа частини сенсора; 6 – демодулятор; 7 –  $F(t)$  функція збурення; 8 –  $\Phi(t)$  модульована функція збурення; 9, 11 – детектори сигналу; 10 – джерело випромінювання; 12 – вхідний світловід; 13 – вихідний світловід; 14 – поєднувач 3x3; 15 – петля сенсора

## 5.2. Сенсор для охорони об'єктів

Оптичний сенсор, який використовують для охорони об'єктів на огороженій території, який показаний на рис. 5.4.

Оптоелектричний модуль локалізує зміну сигналу з безпосередньою зміною петлі світловоду. Кінцевий оптичний сенсор з розподіленням детектування є інтерферометричним сенсором, що використовується для детектування найменших змін механічних напружень у світловодах і дає можливість відтворення функції збурень. При технічному застосуванні дані сенсори повинні бути стійкі до навколишнього середовища.

Подібно до кабельних сенсорів, вони можуть бути поміщені в ґрунт, або прикріплені на огорожі, створюючи зону акустичного спостереження звучання у випадку її перевищення.

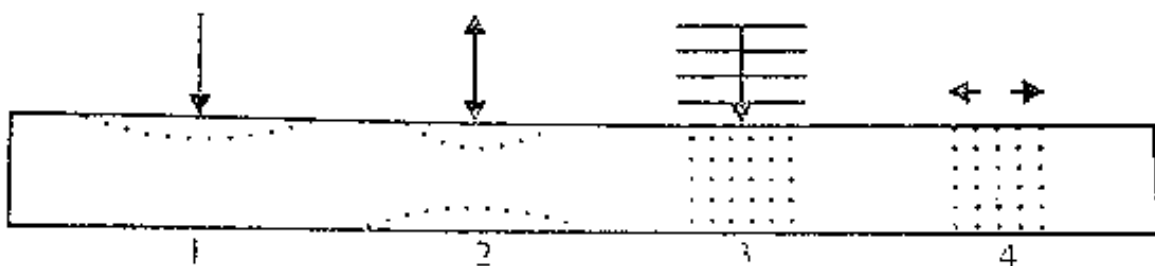


Рис. 5.4. Оптичний сенсор для охорони об'єктів на огороженій території: 1 – мікрозгини; 2 – мультівібрації; 3 – акустична хвиля; 4 – розгалуження

Сенсор такої конфігурації, представлений на рис. 5.5. Даний оптичний сенсор може охоплювати зону біля огорожі і саму огорожу. В даному випадку можна легко ефективно використовувати сенсор, щоб охопити дві зони, поєднавши її з двопетлевим інтерферометром Санька. Таке подвійне використання сенсора при одній системі живлення і детектування значно підвищує ефективність охорони.

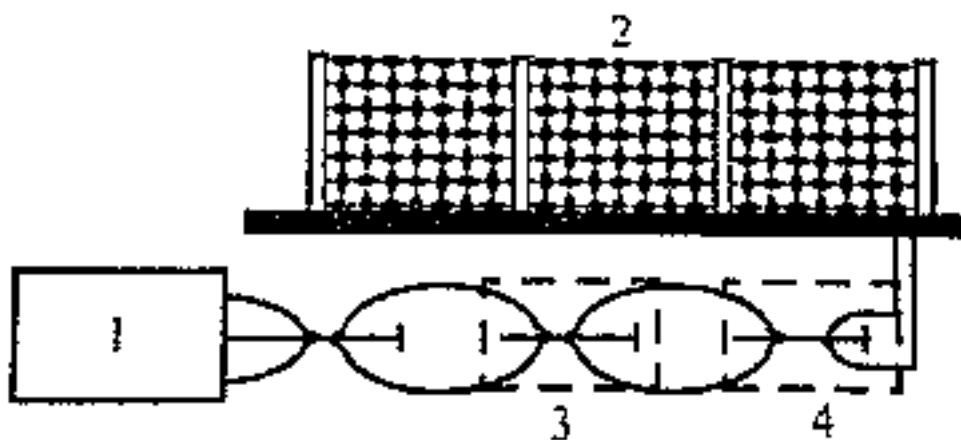


Рис. 5.5. Приклад застосування конфігурації спряжених інтерферометрів, як акустичного сенсора охорони: 1 – оптоелектронна центральна система; 2 – охоронний об'єкт; 3,4 – змінні з'єднання

## ВИСНОВКИ

При виконанні даної роботи було досліджено в повному обсязі оптоелектронний сенсор. Описано особливості і характеристики ВОС. Також дослідили зміну характеристики параметрів сенсора в залежності від внутрішніх і зовнішніх факторів. Було вивчено функції і структури волоконно-оптичних чутливих елементів. Опрацювали сенсори, що використовують інтерференцію світла, а саме: інтерферометр Маха-Цендера, інтерферометр Майкельсона, інтерферометр Фабрі-Перо, інтерферометр з міжмодовою інтерференцією та інтерферометр з двосерцевим волокном.

Дослідили використання оптоелектронних сенсорів у системах охорони та безпеки об'єктів. Наочно продемонстрували принцип роботи даних систем безпеки на практиці. Зобразили послідовність і логіку дій таких систем.

На завершення хотілось би сказати, що волоконно-оптичні сенсори зараз дуже активно досліджуються. Люди масово застосовують дані пристрої як в повсякденному житті, так і на виробництвах різного типу складності. Кожного дня дані сенсори все більше удосконалюються і стають більш практичними.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Т. Окос і ін. 1998. Волоконно-оптичні датчики: 256с.
2. Свечников Г.С. 1988. Інтегральна оптика: 168 с.
3. Свечников Г.С. 1987. Елементи інтегральної оптики: 104 с.
4. Р. Дж. Хансперджер. 2003. Інтегральна оптика: теорія та технологія: 44 с.
5. Л.М. Андрушко, В.А. Вознесенський, В.Б. Каток і ін. Пордам ред. С.В. Свечникова і Л.М. Андрушко. 1988. Довідник по волоконно оптичних ліній зв'язку: 239 с.
6. О.А. Бузова, Є.Г. Дерюгіна, А.С. Донецький і ін. 1989. Можливості застосування волоконно-оптичних датчиків для вимірювання параметрів магнітного поля. Огляди з електронної техніки. Серія 8 «Управління якістю, стандартизація, метрологія, випробування», випуск 6 (1 464): 73 с.
7. Наукова думка. 1970-1980. Датчик: 11 с.
8. І. О. Анніна, Г. Н. Горюшина, І. С. Гнатюк та ін. 2003. Російсько-український словник: 1973. - Т. 1. - 584 с.; Т. 2. - 574 с.
9. Енциклопедія кібернетики. 1973: Т. 1. - 584 с.; Т. 2. - 574 с.
10. Гінзбург М. Д. 2003-2008. Давач чи датчик, як правильно?: Термінологія. Як правильно українською: давач чи датчик? Електроінформ. - 2003. - № 4. - С. 39-40. Як правильно, Що таке давач? // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2004. - № 1. - С. 81-84. Метрологічна термінологія. Давач чи датчик? Метрологія та прилади. - 2008. - № 2. - С. 59-64.)
11. ДСТУ 2681-94 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологія. Терміни та визначення.

12. Енциклопедія кібернетики. 1973: 584 с.
13. C. A. Grimes, E. C. Dickey, and M. V. Pishko. 2006. Encyclopedia of Sensors (10-Volume Set), American Scientific Publishers. ISBN 1-58883-056-X
14. Blaauw, F.J., Schenk, H.M., Jeronimus, B.F., van der Krieke, L., de Jonge, P., Aiello, M., Emerencia, A.C. 2016. Let's get Physiqua! - An intuitive and generic method to combine sensor technology with ecological momentary assessments. Journal of Biomedical Informatics, vol. 63: 141-149.
15. В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, Ю. В. Яцук; ред.: Є. С. Поліщук, В. М. Ванько. 2015. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): 580 с.
16. М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин . 2014. Давачі: навч. посіб: 198 с.
17. М. О. Гаврилюк. 2001. Давачі систем автоматики: Навч. посіб. для студ. баз. напрямку «Комп'ютериз. системи, автоматика і упр.»: 180 с.
18. В. С. Білецького. 2004 - 2013. Мала гірнича енциклопедія.
19. І. А. Большакова, М. Р. Гладун, Р. Л. Голяка, З. Ю. Готра, І. Є. Лопатинський, Є. Потенцкі, Л. І. Сопільник. 2001. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля: 412 с.
20. І. А. Большакова, І. М. Годинюк, Р. Л. Голяка та ін. ; за ред. З. Ю. Готри. 2013. Структури та параметри мікроелектронних гальваномагнітних сенсорів магнітного поля: монографія: 414 с.
21. Тесленко В. А. 2004. Датчики в системах сбора данных и управления «ПиКАД».



22. Папушин Ю. Л., Білецький В. С. 2007. Основи автоматизації гірничого виробництва: 168 с.
23. Іванов А. О. 2003. Теорія автоматичного керування: 250 с.
24. П. В. Мокренко. 2000. Елементи і пристрої фізичної та електронної охорони об'єктів: 186 с.
25. Аксіментьєва О.І., Черпак В.В., Глушик І.П., Стахіра П.Й., Белюх В.М., Польовий Д.О. 2006. Сенсорні матеріали: 78-83 с.
26. Черпак В.В., Глушик І.П., Аксіментьєва О.І., Готра З.Ю., Стахіра П.Й., Волинюк Д.Ю. 2006. №3/3(21). Східно-європейський журнал передових технологій: 75-77 с.
27. Готра З.Ю., Черпак В.В., Глушик І.П., Стахіра П.Й., Волинюк Д.Ю., Фоменко В.Л. 2006. Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки: 3-6 с.